Twee-transistoren versterkers

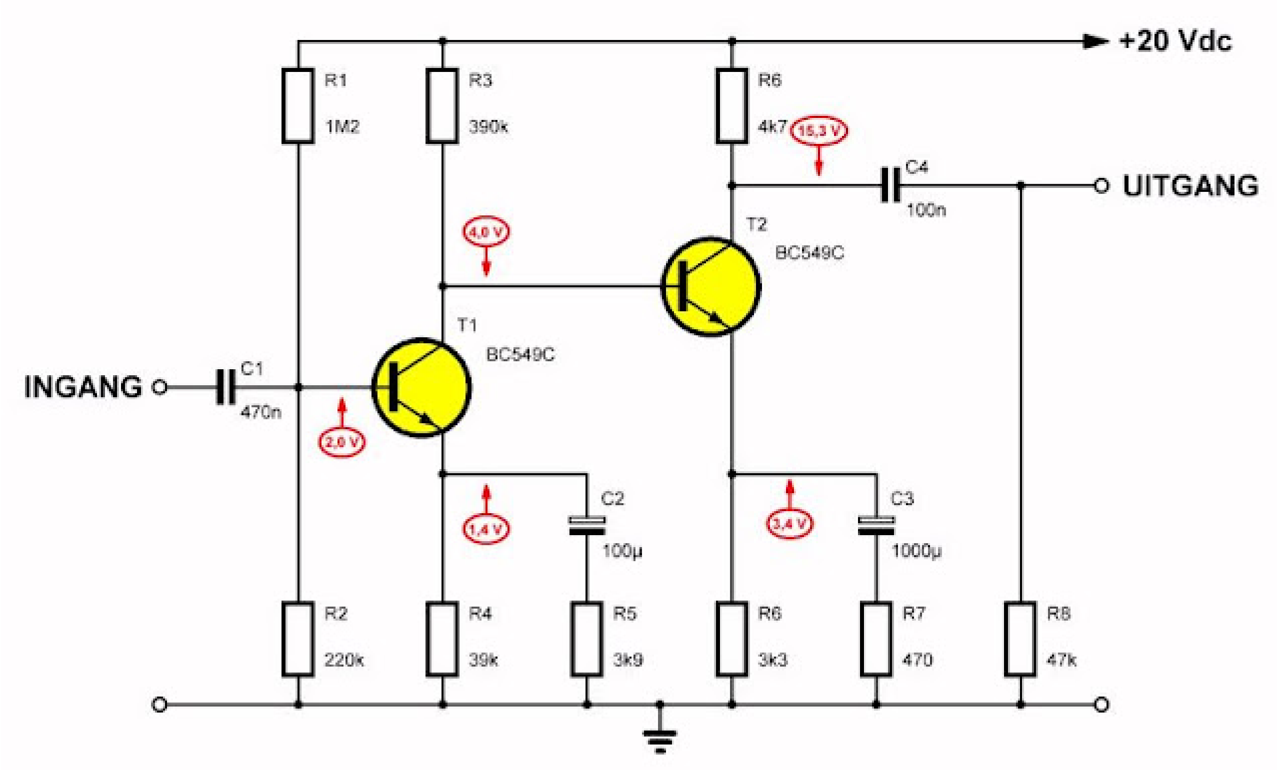
Als u meer wilt versterken dan de een-transistor versterker toestaat moet u overschakelen naar schema's met twee transistoren. Dat kan zowel NPN/NPN zijn als NPN/PNP. Deze schakelingen zijn bovendien veel stabieler en hebben kleinere vervormingen.

Auteur: Jos Verstraten, Landgraaf, Nederland
Email: josverstraten@live.nl

Publicatiedatum: 27-11-2018

Schakelingen met 2 x NPN-transistoren

Twee identieke trappen achter elkaar schakelen?
Met een een-transistor versterker kunt u helaas vrij geringe signaalversterkingen verkrijgen, althans in de veronderstelling dat u prijs stelt op stabilisatie van de instelling en lage vervorming. Wilt u meer versterken, dan moet u meer dan een transistor inschakelen. Nu kunt u daarvoor in principe twee een-transistor schakelingen volgens onderstaande figuur achter elkaar schakelen, zodat een direct gekoppelde twee-transistoren schakeling ontstaat.
De eerste trap versterkt 390 kΩ gedeeld door 3,9 kΩ is gelijk aan honderd keer. De wisselspanningsversterking wordt immers gedicteerd door de verhouding tussen de collectorweerstand R3 en de weerstand R5 in serie met de emittercondensator. De tweede trap versterkt 4,7 kΩ gedeeld door 470 Ω is gelijk aan tien keer. De totale signaalversterking van deze schakeling is dus ongeveer gelijk aan 1.000. Ongeveer, omdat de versterking van de eerste trap iets lager zal uitvallen vanwege de belasting van deze trap door de basisstroom van de tweede transistor.



De meest eenvoudige schakeling van een twee-transistoren versterker.
(© 2018 Jos Verstraten)

Eigenschappen van de schakeling
De spanningsversterking van deze schakeling zal weinig te wensen overlaten. Maar wat betreft de stabiliteit moet u het ergste vrezen! De stabilisatie door middel van een emitterweerstand is goed bruikbaar voor één trap. De kleine variaties op de instelling hebben geen grote verschuivingen in de collectorspanning tot gevolg. Maar als u de collectorspanning van de eerste trap gebruikt voor het instellen van de tweede trap, dan zullen deze kleine variaties door de tweede trap extra versterkt worden, waardoor het heel goed mogelijk is dat de tweede trap volledig vast loopt tegen de voedingsspanning of de massa.

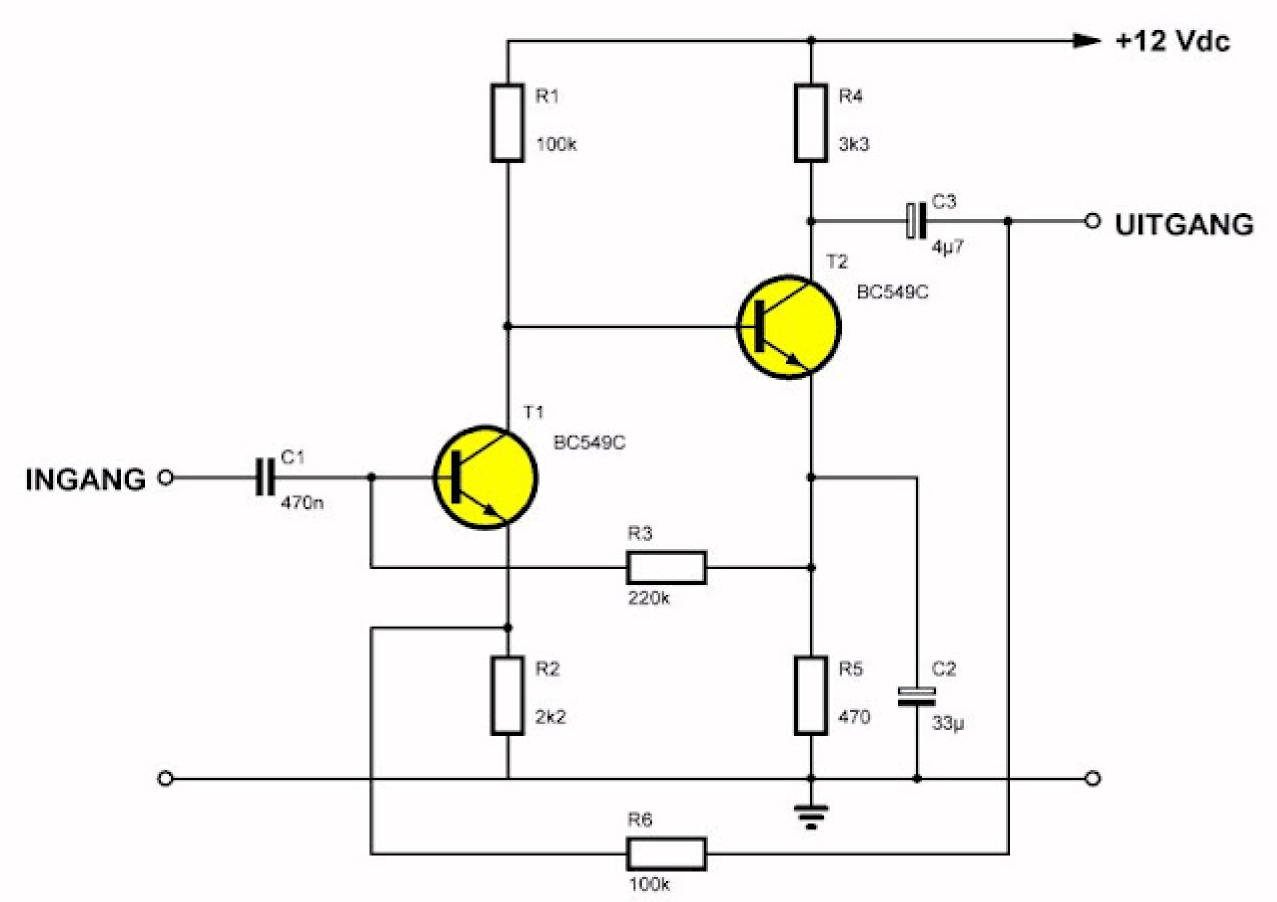
Tegenkoppeling absoluut noodzakelijk
Wilt u twee trappen rechtstreeks koppelen, dan moet u een vorm van tegenkoppeling gaat toepassen, waardoor de uitgangsspanning van de tweede trap de instelling van de eerste trap mede bepaalt. Het systeem zal zichzelf stabiliseren waardoor afwijkingen van de instelspanningen, bijvoorbeeld onder invloed van de temperatuur, automatisch worden gecompenseerd.

Twee-transistoren versterker met tegenkoppeling
Het schema van een praktisch bruikbare tegengekoppelde twee-transistoren versterker is getekend in onderstaande figuur. De spanning op de emitter van de tweede transistor wordt nu gebruikt voor het instellen van de basis van de eerste trap.
De werking is gemakkelijk te doorgronden. Op het moment dat u de voeding inschakelt staan alle punten uiteraard op massapotentiaal. Het gevolg is dat de basis van de eerste transistor geen sturing ontvangt en deze halfgeleider volledig in sper staat ingesteld. De collectorspanning is dus gelijk aan de voedingsspanning. De tweede transistor zal nu via de weerstand R1 een flinke basisstroom gaan trekken. Het gevolg is dat T2 flink gaat geleiden en een grote collectorstroom door R5 en R4 stuurt. Over R4 ontstaat een grote spanning, die via de weerstand R7 de basis van de eerste transistor stuurt. Deze halfgeleider gaat nu ook geleiden, waardoor er collectorstroom door R1 gaat lopen. De spanningsval over deze weerstand heeft tot gevolg dat de collectorspanning daalt en de basisstroom van de tweede transistor kleiner wordt.
Het in geleiding komen van de eerste transistor heeft dus tot gevolg dat de tweede transistor minder gaat geleiden. De waarde van de weerstanden R4 en R7 bepaalt nu de evenwichtssituatie, waarbij beide halfgeleiders elkaar in een bepaalde mate in geleiding houden.

Grote stabiliteit
Het zal duidelijk zijn dat deze situatie uitermate stabiel is. Iedere wijziging in bijvoorbeeld de versterkingsfactor van een van de transistoren wordt onmiddellijk gecorrigeerd doordat de andere transistor dan minder of meer gaat geleiden en daardoor de eerste transistor zo stuurt, dat de oorspronkelijke variatie wordt tegengewerkt.
Het stabiliseren van de schakeling op gelijkspanningsgebied heeft ook invloed op de wisselspanningsversterking. Op de emitter van T2 staat immers ook een klein signaaltje en ook dit signaaltje wordt via de weerstand R7 teruggekoppeld naar de basis. Hierdoor wordt de eerste transistor minder met signaal gestuurd (het signaal op de emitter van T2 is immers in tegenfase), waardoor de signaalversterking iets gaat dalen. Als de waarde van R7 echter zeer groot is ten opzichte van de overige weerstanden is dit versterkingsverlies te verwaarlozen.

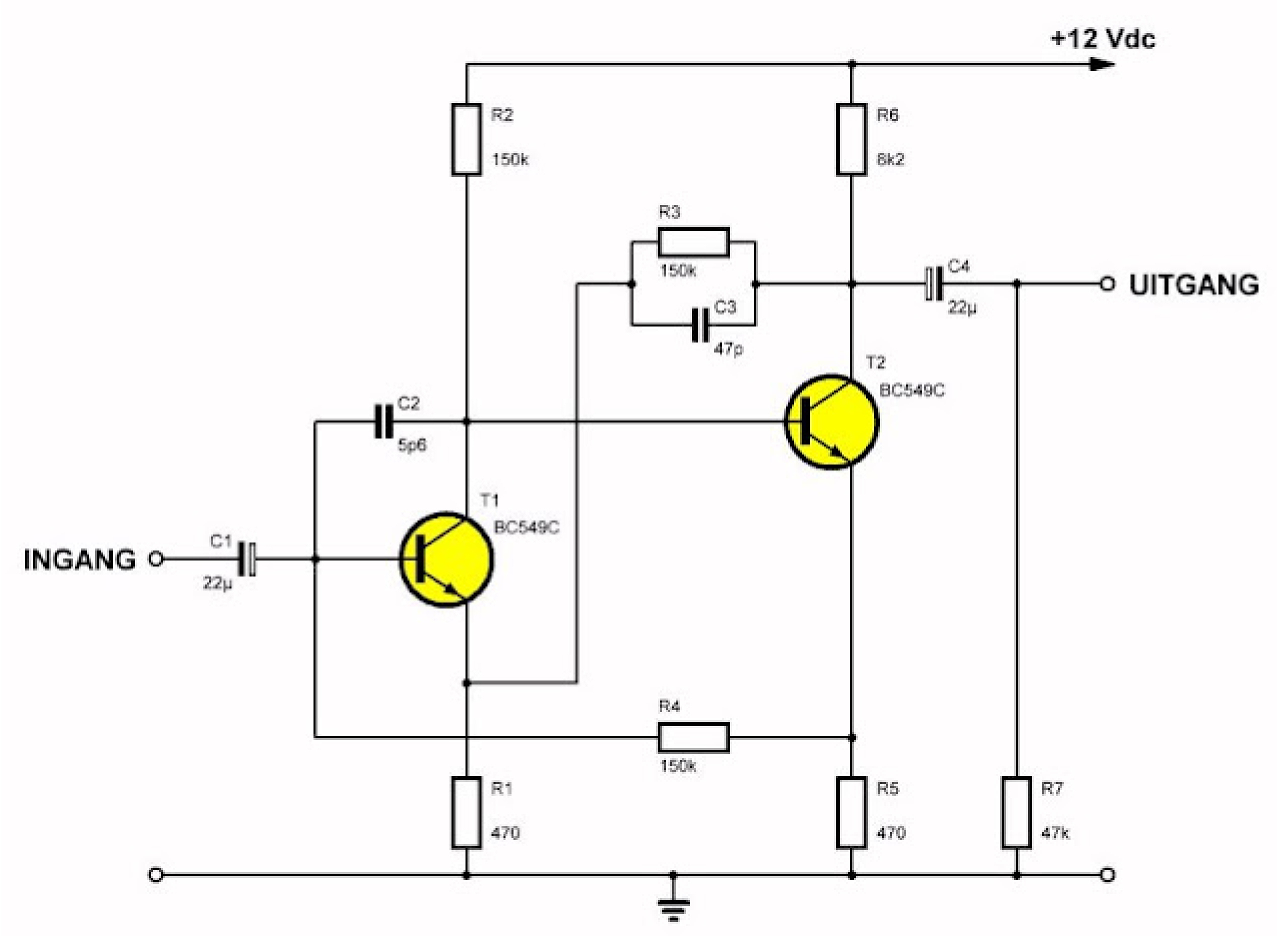
Dubbele tegenkoppeling
Op het basisschema van de vorige figuur zijn ontelbare variaties bedacht. Vaak wordt de eerste terugkoppeling van emitter naar basis nog eens aangevuld met een tweede terugkoppeling van de collector van T2 naar de emitter van T1. Ook deze punten zijn immers in tegenfase! Doel is de schakeling nog stabieler te maken en de signaalvervorming te minimaliseren.
In de onderstaande figuur is een praktisch voorbeeld van een dergelijke schakeling getekend. De signaalversterking is gelijk aan 46, de uitgangsimpedantie laag en de ingangsimpedantie hoog. De terugkoppeling via R3 is resistief en werkt dus in op de gelijkspanningsinstelling van

de schakeling. De emitter van T2 is immers door C2 ontkoppeld en bevat geen signaalspanning. De tweede terugkoppeling via R6 is capacitief (immers, er wordt na de scheidingscondensator C3 afgenomen) en werkt dus alleen in op de signaalversterking. De waarde van de weerstand R6 bepaalt zowel de grootte van de in- als van de uitgangsimpedantie. Dit is een gevolg van de tegenkoppeling van het signaal die door deze weerstand wordt geïntroduceerd. Als R6 kleiner wordt zal de uitgangsimpedantie afnemen, maar de ingangsimpedantie toenemen.



Een twee-transistoren versterker met dubbele terugkoppeling. (© 2018 Jos Verstraten)

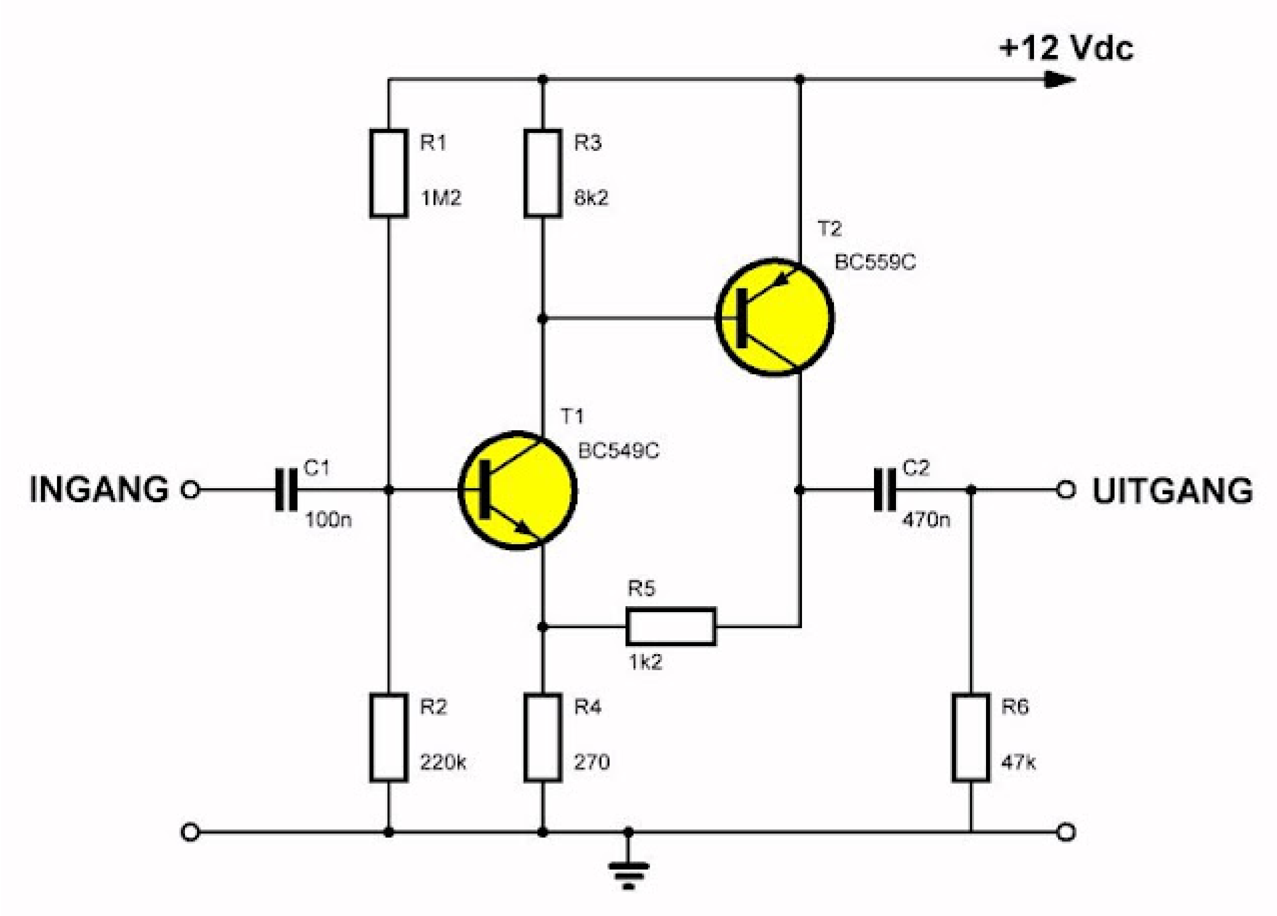
Een alternatieve schakeling
In de onderstaande figuur is een alternatieve schakeling getekend, waarbij de twee tegenkoppelingen resistief zijn uitgevoerd en dus beiden de instelling stabiliseren. Omdat bovendien de emitter van de tweede trap niet capacitief ontkoppeld is, werkt ook de tegenkoppeling via de weerstand R4 in op de signaalversterking. De signaalversterking wordt hoofdzakelijk bepaald door de verhouding tussen de weerstanden R3 en R1 en bedraagt, met de ingetekende waarden, ongeveer 300 maal.
De condensatoren C2 en C3 zijn aangebracht om de bandbreedte van de schakeling iets te beperken. Het heeft weinig zin om typische laagfrequent versterkers te laten doorlopen tot in het MHz gebied. Een kaarsrechte doorlaatband tot 500 kHz is voor dit soort toepassingen meer dan voldoende. De kleine condensatoren vormen een kortsluiting voor hoge frequenties, waardoor de versterking voor deze frequenties gaat dalen.



Een alternatieve schakeling met dubbele terugkoppeling. (© 2018 Jos Verstraten)

Schakelingen met PNP/NPN-transistoren

Een eerste voorbeeld
Naast twee-transistoren versterkers met twee NPN-transistoren zijn diverse schakelingen ontwikkeld, waarbij gebruik wordt gemaakt van een combinatie van een NPN- en een PNP-transistor. Het grote voordeel is dat u veel minder weerstanden nodig hebt om identieke versterkingsfactoren te verkrijgen. In onderstaande figuur is een typisch voorbeeld van een dergelijke schakeling getekend. Deze versterker is zeer sterk tegengekoppeld. Het nadeel is dat de signaalversterking daardoor daalt tot ongeveer 5, maar daar staat tegenover dat de signaalvervorming tot ver onder de 0,01 % daalt!



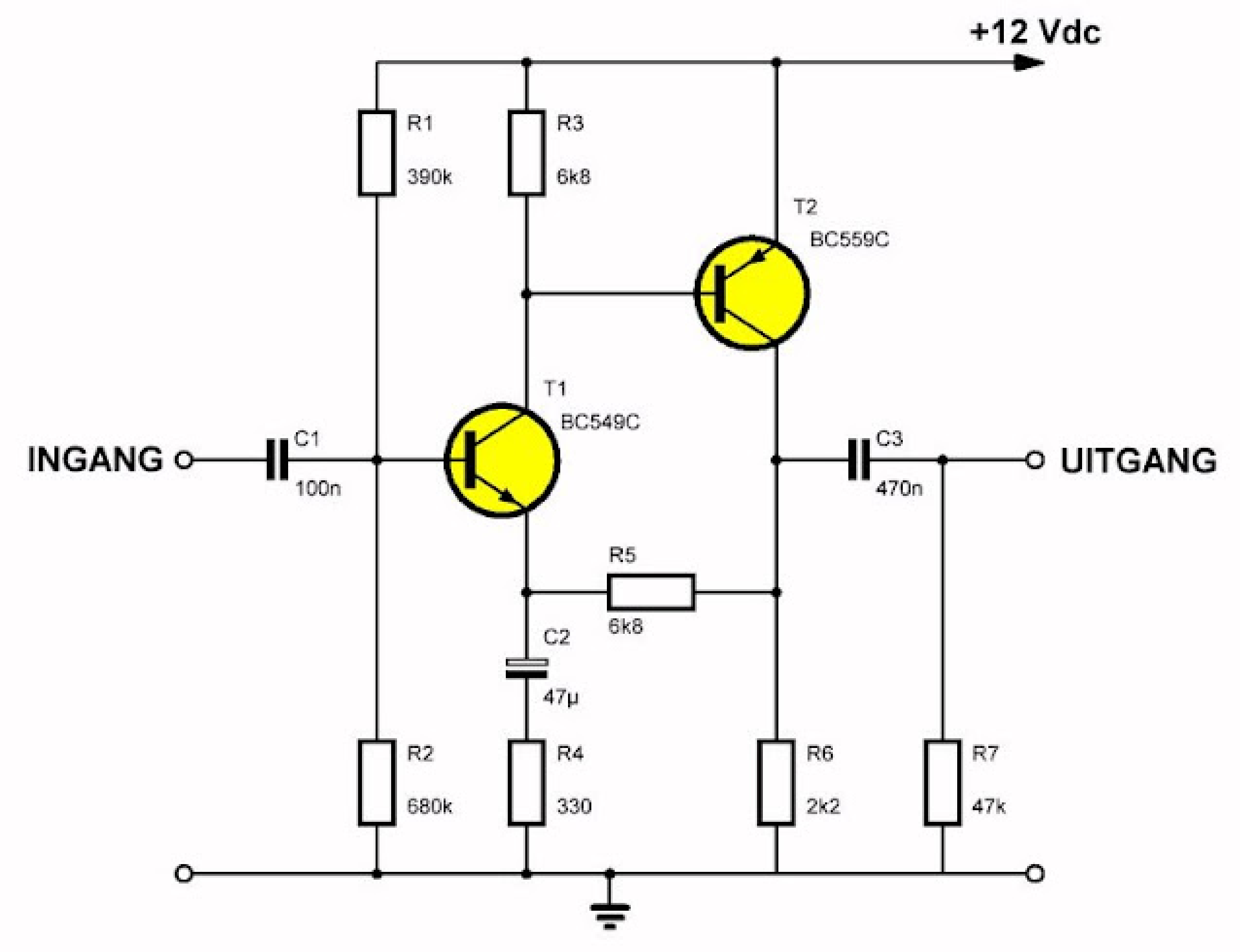
Een voorbeeld van een twee-transistoren versterker met een PNP/NPN-combinatie.
(© 2018 Jos Verstraten)

Berekenen
De signaalversterking $A_{signaal}$ kunt u vastleggen door de verhouding tussen de weerstanden R5 en R4 en wel volgens de formule:
$A_{signaal} = (R4 + R5)/ R4$
Nadien kunt u de uitgang van de schakeling op de helft van de voedingsspanning instellen door het veranderen van de verhouding tussen de weerstanden R1 en R2. Door de sterke tegenkoppeling via R5 heeft de schakeling een zeer hoge ingangsimpedantie en een zeer lage uitgangsimpedantie. Met wat wiskunde zou u kunnen berekenen dat de uitgangsimpedantie van de getekende schakeling slechts ongeveer 10 Ω bedraagt. Het afsluiten met een emittervolger is dus volstrekt overbodig.

Een zeer hoogwaardige versterker
De schakeling van de vorige figuur heeft uitstekende eigenschappen. Dergelijke schakelingen kunt u gebruiken in hoogwaardige LF-apparatuur, bijvoorbeeld voor het oppeppen van de uitgangsspanning van een tuner tot de standaard waarde van 0,775 V (0 dB). Een ander voordeel van deze schakeling is dat er geen faseverschil bestaat tussen het ingangs- en het uitgangssignaal.
Het enige nadeel is dat door het instellen van de signaalversterking (R4, R5) ook de instelling van de trap varieert, met als gevolg dat u dan weer met R1 en R2 moet gaan stoeien. Het is dus niet mogelijk de versterking door middel van een instelpotentiometertje over een groot bereik instelbaar te maken.

Instelbare versterking
Met de schakeling die in onderstaande figuur wordt voorgesteld kan dat wél. Het enige verschil is dat de signaaltegenkoppeling wordt gescheiden van de instellingstegenkoppeling door het introduceren van de condensator C2. Uiteraard moet er nu een extra weerstand R6 worden aangebracht want anders kan transistor T2 geen stroom geleiden.
Ook nu wordt de signaalversterking volgens de reeds gegeven formule bepaald door de verhouding tussen R4 en R5. U kunt nu echter deze verhouding wijzigen zonder dat de

instelspanningen van de trappen worden verstoord. Door bijvoorbeeld R4 onder de vorm van een instelpotentiometertje uit te voeren kunt u de signaalversterking van deze schakeling aan uw behoefte aanpassen. Doordat signaal en instelling op een andere manier worden tegengekoppeld, moet u wel rekening houden met een ietsje meer vervorming dan bij de schakeling van de vorige figuur.



Met deze schakeling kunt u de signaalversterking wijzigen zonder de instelling te beïnvloeden. (© 2018 Jos Verstraten)